

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM
ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE
CONCRETO ARMADO E AÇO

ANÁLISE DE ASPECTOS DO PROJETO DE BASE DE
AEROGERADORES UTILIZANDO ELEMENTOS FINITOS DE CASCA
E SÓLIDOS

NERO DE ALMEIDA VIEIRA

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE
ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO E AÇO

**ANÁLISE DE ASPECTOS DO PROJETO DE BASE DE AEROGERADORES
UTILIZANDO ELEMENTOS FINITOS DE CASCA E SÓLIDOS**

NERO DE ALMEIDA VIEIRA

Trabalho Final apresentado ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Especialista em Análise e Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado e Aço".

Comissão Examinadora:

Prof. Fernando Amorim de Paula, D.Sc.
DEES – UFMG (Orientador)

Prof. Ney Amorim Silva, D.Sc.
DEES – UFMG

Belo Horizonte, 27 de Julho de 2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida.

Agradeço também a minha esposa Cristiane, pelo companheirismo, paciência e apoio no dia a dia, fortalecendo meus ânimos para vencer as dificuldades que a vida nos oferece e que, com todo entusiasmo, compartilha comigo os momentos de alegria.

Agradeço, com louvor, a minha filha Luísa, por me ensinar o verdadeiro sentido da vida e transbordar minha vida de felicidade.

Agradeço aos meus pais, Nélia e Euclides, por me passarem o ensinamento essencial, para viver uma vida com humildade e dignidade.

Agradeço aos meus irmãos Olívio, Euclides e Vinícius (Em Memória) por serem exemplos de seres humanos para mim.

Agradeço à VLB Engenharia pela oportunidade de poder desenvolver projetos relacionados ao tema desse trabalho e por toda a experiência adquirida ao longo dessa caminhada.

Agradeço a todos os professores e funcionários da Escola de Engenharia, por proporcionarem um curso tão proveitoso. Em especial, agradeço ao professor Fernando Amorim, pela competência e disponibilidade em me orientar nesse trabalho de imensa importância para mim.

Resumo

Atualmente, o setor de energia eólica vem ganhando espaço na matriz elétrica brasileira e cada vez mais são necessários projetos otimizados que atendam as especificações técnicas dos fornecedores dos aerogeradores e às orientações das normas vigentes, tanto brasileiras como internacionais. Desta forma, busca-se desenvolver, no presente trabalho, um estudo de modelos numéricos que representa uma solução para bases de fundação, sobre estacas, que suportam aerogeradores projetados em usinas eólicas. Será feita uma avaliação comparativa de dois modelos numéricos distintos, via Método dos Elementos Finitos, através do *software* SAP2000, com mesmo carregamento aplicado. O primeiro modelo será representado por uma malha em elementos finitos de casca do tipo “shell”, com quatro nós, que utiliza uma formulação isoparamétrica e a discretização obedece a disposição da estrutura, considerando as diferentes espessuras que a compõe. O segundo modelo será representado por uma malha em elementos finitos sólidos do tipo “Solid”, com oito nós. Serão apresentados os resultados do pós-processamento, mostrando-se as tensões normais e a deformada em uma seção específica, assim como a rotação em que a base é submetida, a partir dos deslocamentos relativos nos bordos. Serão apresentadas, também, as reações nas estacas, comparando-as com os resultados encontrados por uma solução analítica em que se considera o bloco rígido, através do Método da Superposição. Será processada ainda uma análise de convergência para o modelo sólido, aumentando-se significativamente a discretização dos elementos do tipo “solid” e apurando-se os resultados das tensões em relação ao modelo do tipo “shell”.

Palavras-chave: Base de Fundação, Aerogerador, Método dos Elementos Finitos.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
2	OBJETIVO	7
3	CARACTERIZAÇÃO DOS ELEMENTOS FINITOS	8
3.1	Elemento Finito do Tipo Casca	8
3.2	Elemento Finito do Tipo Sólido	8
4	ANÁLISE NUMÉRICA	9
4.1	Projeto de Base de Fundação para Aerogerador	9
4.2	Modelos de Cálculo	11
4.3	Resultados Obtidos	17
4.4	Estudo de Convergência	23
4.5	Avaliação das Reações nas Estacas	24
5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	26
6	REFERÊNCIAS	28

1 INTRODUÇÃO

Devido à crescente importância do setor eólico na matriz elétrica brasileira e a busca de projetos cada vez mais econômicos, mas que atendam as especificações técnicas dos fornecedores de aerogeradores, projetados em usinas eólicas, torna-se necessário uma avaliação mais criteriosa e segura dos modelos de cálculo utilizados pelas projetistas.

Segundo o Boletim Anual de Geração da ABEEólica, no ano de 2016, foram adicionados à matriz elétrica brasileira mais de 2 GW de energia eólica em 81 novos parques eólicos, fazendo com que o setor chegasse ao final de 2016 com 10,75 GW de capacidade instalada em 430 parques, representando 7% da matriz energética brasileira. O Brasil alcançou também marcas mundiais ultrapassando a Itália e ocupa atualmente a nona posição no Ranking Mundial de capacidade instalada de energia eólica.

Desta forma, vislumbrando-se essa aceleração no setor eólico e frente às oportunidades reais de projetos lançados no mercado da Engenharia Civil, desenvolveu-se este trabalho para melhor entender as soluções para fundações de Aerogeradores e avaliar de forma criteriosa os aspectos que envolvem os modelos de cálculo utilizados nos projetos estruturais.

Para o cumprimento dos objetivos deste trabalho, foram desenvolvidos os seguintes itens:

- I. Caracterização dos elementos finitos, adotados nos modelos de cálculo, do tipo casca e do tipo sólido;
- II. Resumo, com detalhes, de um projeto estrutural de base de fundação para aerogerador;
- III. Desenvolvimento de 2 (dois) modelos numéricos via Método dos Elementos Finitos (MEF) utilizando o programa SAP2000, considerando-se análise linear. O primeiro modelo é representado por uma malha de elementos finitos do tipo casca, utilizando-se elemento “shell”, e o segundo por uma malha de elementos finitos do tipo sólido, utilizando-se o elemento “solid”;

- IV. Avaliação comparativa dos resultados encontrados nos 2 (dois) modelos. Serão avaliadas as tensões normais e os deslocamentos horizontais em uma seção específica da base, assim como a rotação em que a base é submetida, a partir dos deslocamentos relativos nos bordos;
- V. Estudo de convergência do modelo do tipo sólido em comparação ao modelo do tipo casca;
- VI. Avaliação das reações nas estacas, comparando-se os resultados encontrados com uma solução analítica em que se considera o bloco rígido, onde as reações são calculadas através do Método da Superposição;
- VII. Conclusões e considerações finais.

2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo estudar, e fazer uma avaliação comparativa dos resultados encontrados por modelos numéricos, via MEF, que representam uma base de fundação para aerogeradores projetados em usinas eólicas, com malhas do tipo “shell” e do tipo “solid”.

Como resultados, deseja-se confirmar a proximidade dos esforços internos e externos e os deslocamentos encontrados na base tanto para um modelo menos sofisticado, representado por elementos do tipo “shell” quanto para um modelo mais sofisticado, representado por elementos do tipo “solid”.

3 CARACTERIZAÇÃO DOS ELEMENTOS FINITOS

3.1 Elemento Finito do Tipo Casca

As estruturas laminares com elementos planos são comuns em numerosos campos da engenharia. Podem-se citar como exemplos pontes rodoviárias, coberturas, depósitos, cascos de navios, fuselagens de aviões, assim como as fundações de torres eólicas, entre inúmeras outras estruturas.

Conforme Oñate (1995), pode-se considerar as estruturas do tipo casca como uma generalização das placas ao caso de superfície média não plana. Esta condição confere às cascas o aparecimento de esforços axiais (efeito de membrana) no plano da superfície média que representa a estrutura. A obtenção das equações de uma casca (equilíbrio, constitutivas e cinemáticas) é complexa devido à curvatura da sua superfície média. Desta forma, uma maneira mais simples de tratar este problema é estudar o comportamento de uma casca como elementos planos de dimensão pequena. Para esses elementos utiliza-se a formulação de elementos de casca plana de Reissner-Mindlin como extrapolação dos elementos de placa.

Os elementos de casca possuem 6 (seis) graus de liberdade por nó, 3 (três) de translação e 3 (três) de rotação, e combinam separadamente os comportamentos de membrana e de flexão das placas. Para o caso de placas finas, conforme será considerado nesse trabalho, não se leva a efeito a deformação devida ao esforço cortante.

A estrutura composta por elementos de casca é representada pelo seu plano médio. Como característica desse elemento, a seção transversal permanece plana após sua deformação e o diagrama de tensões e de deformações, ao longo da seção transversal, é linear.

3.2 Elemento Finito do Tipo Sólido

Os elementos sólidos são utilizados para modelar estruturas sólidas tridimensionais. Os elementos utilizados, no presente trabalho, possuem oito nós, formando um cubo.

O sistema local de coordenadas coincide com o sistema global de coordenadas. Os graus de liberdade dos nós do elemento sólido são todos de translação, sendo três graus de liberdade para cada nó e não possuem graus de liberdade de rotação.

A modelagem em elementos sólidos possui uma definição precisa da geometria da estrutura e representa seu comportamento conforme a configuração espacial do Modelo, diferente do modelo em elementos de casca que representa o comportamento da estrutura através do plano médio.

De uma maneira genérica, o módulo de elasticidade pode variar conforme a direção, o que permite modelar materiais que apresentam essa característica, como exemplo materiais compósitos. Para o presente trabalho será considerado material homogêneo, cujas as propriedades independem da direção.

4 ANÁLISE NUMÉRICA

4.1 Projeto de Base de Fundação para Aerogerador

O Projeto de uma base de fundação de um aerogerador não é simples e requer um estudo complexo que abrange inúmeras informações geotécnicas e estruturais para que se possa consolidar um modelo de cálculo que represente a estrutura em pauta.

Para se iniciar a construção do modelo de cálculo é necessário que se tenha conhecimento do solo em que se apoiará o bloco de fundação, pois será necessário definir as condições de contorno da estrutura. Desta forma, torna-se necessária uma investigação geotécnica do solo, normalmente consolidada através de uma sondagem. A partir dos resultados encontrados, pode-se aferir os parâmetros geotécnicos, complementados por meio de formulações empíricas encontradas em bibliografias consagradas. Estes parâmetros devem ser confirmados por ensaios específicos, realizados em campo, ressaltando-se que as informações definidas inicialmente, a partir das sondagens, são bem assertivas. Para o modelo de cálculo desenvolvido no presente trabalho, as condições de contorno adotadas são constituídas por

molhas elásticas que representam as estacas sob o bloco de fundação e a contribuição do solo foi desprezada.

Deve-se definir, também, os parâmetros do concreto e aço a serem utilizados no modelo de cálculo, como a resistência característica à compressão f_{ck} , módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson do concreto e tensão de escoamento f_y , módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson do aço.

Todos os carregamentos a serem adotados no modelo de cálculo devem ser considerados na modelagem. Esses carregamentos são compostos pelas cargas dinâmicas, oriundas do vento, e as cargas estáticas como peso próprio do bloco e peso do reaterro, sobre o bloco de fundação. Os pesos do bloco e do reaterro têm importância fundamental para a estabilidade da base. O carregamento devido ao vento, normalmente já é estudado e fornecido pelo fornecedor do aerogerador, repassado como carregamento estático na base do aerogerador.

Antes de se iniciar a modelagem do bloco de fundação, para o dimensionamento das armaduras, deve-se avaliar a estabilidade da base, normalmente desenvolvida através de solução analítica onde se considera o bloco totalmente rígido. Normalmente a geometria do bloco é definida pelo Caso de Carregamento Normal, onde se adota como requisito 100% da base do bloco comprimida, e as armaduras são definidas a partir do Caso de Carregamento Extremo, mas isso não é regra. Deve-se acrescentar também a verificação do deslocamento diferencial máximo da base, considerando-se os carregamentos máximos atuantes. Normalmente, conforme critério estabelecido pelo fornecedor do aerogerador, esse deslocamento diferencial máximo aceitável tem valor igual a 3,0 mm/m.

Finalmente, já definidos os parâmetros geotécnicos, e conseqüentemente as condições de contorno do modelo, a geometria do bloco de fundação e os carregamentos a serem adotados, pode-se iniciar a construção do modelo de cálculo, com a concepção do projeto já consolidada de forma segura.

O dimensionamento não se resume apenas no detalhamento das armaduras do bloco e devem ser aferidas algumas verificações complementares, como por exemplo, a verificação das

tensões máximas localizadas no "grout" e no concreto do pedestal do bloco, conforme as conexões entre torre/bloco. Essa avaliação pode ser feita por meio de um estudo analítico, inferindo-se as reações nos chumbadores pelo Método da Superposição e posteriormente considerando as dimensões da chapa de base do contato da torre com o bloco para aferir as tensões. Algumas armaduras adicionais podem ser solicitadas para reforçar as ancoragens de "anchor bolts" no concreto do bloco. Conforme critério do fornecedor do aerogerador e as recomendações das normas vigentes, deve-se verificar a fadiga de todas as armaduras adotadas, assim como a verificação da fadiga do concreto do bloco de fundação, por se tratar de carregamentos cíclicos atuantes no bloco de fundação.

No caso do presente documento, o *software* utilizado para auxiliar no desenvolvimento do trabalho foi o SAP2000.

Conforme já se conhece, a dimensão dos elementos finitos apresenta influência considerável na convergência dos resultados e, por esse motivo, deve ser estudada com muito cuidado. Quando se processa a discretização, quanto menores são os elementos, mais precisa se torna a solução, entretanto, quão grande se torna a matriz de rigidez e maior é o tempo de resposta computacional. Além disso, o tipo de elemento finito utilizado, pode influenciar na convergência dos resultados, a partir do número de graus de liberdade característico do elemento adotado.

Desta forma, tomou-se como incentivo a avaliação dos resultados alcançados através de dois modelos de elementos finitos, um mais complexo, representado por elementos do tipo "solid", com oito nós, e outro com elementos do tipo "shell", com quatro nós, representado por uma malha mais simplificada, onde a estrutura é representada por um plano médio.

4.2 Modelos de Cálculo

Os modelos, adotados nas análises, devem representar uma base de fundação para aerogerador. Como o objetivo é fazer uma análise comparativa dos resultados, apenas pelo fato da utilização de diferentes tipos de elementos finitos, adotou-se a mesma seção, material e mesmo carregamento para ambos.

O bloco considerado nas análises é em concreto armado e apoiado em 36 (trinta e seis) estacas metálicas. Sua planta e seção são apresentadas na figura a seguir:

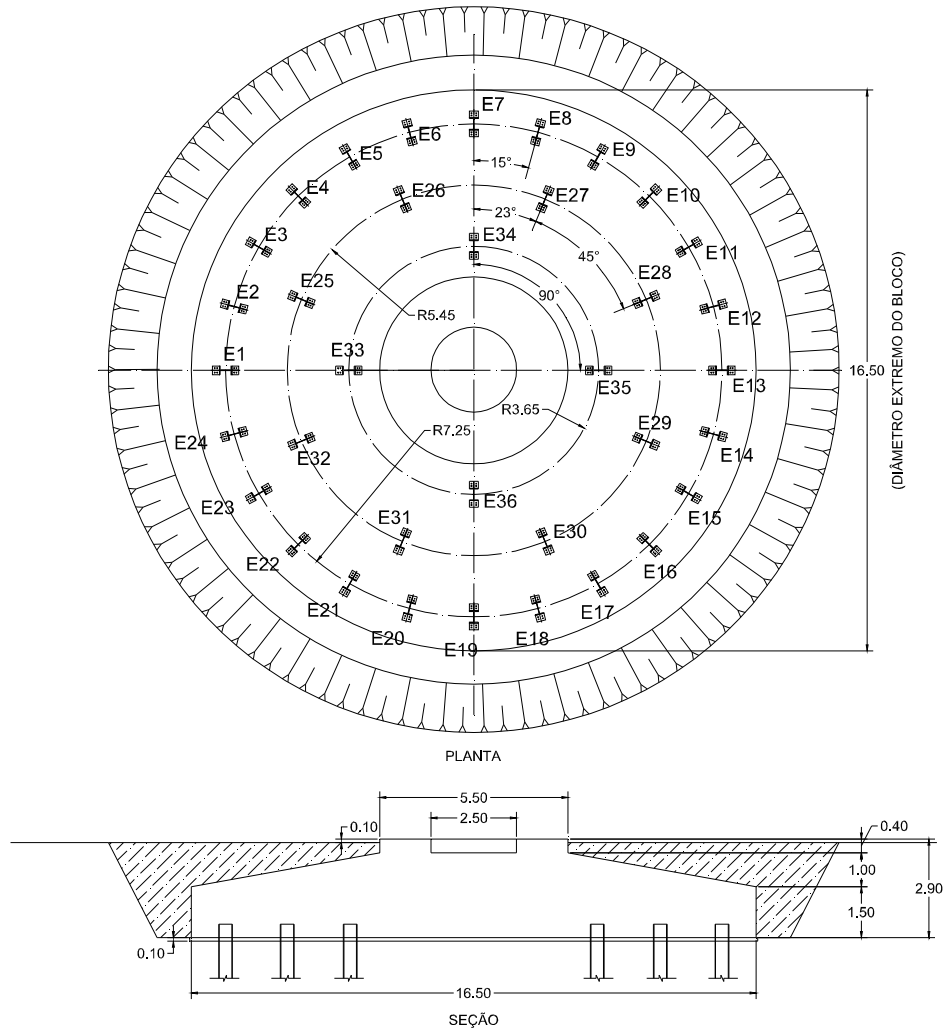


Figura 4.1 – Planta e Seção do Bloco de Fundação

Para o estudo específico, apresentado no presente documento, as análises foram todas lineares e não foi foco do trabalho determinar as armaduras requeridas. Desta forma, adotou-se para o concreto os seguintes parâmetros:

Resistência à compressão..... $f_{ck} = 35 \text{ MPa}$

Módulo de Elasticidade..... $E_c = 28,1 \text{ GPa}$

Coefficiente de Poisson..... $\mu = 0,2$

Peso específico..... $\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$

Conforme já explanado nos itens anteriores, foram desenvolvidos 2 (dois) modelos de cálculo. O primeiro construído por elementos de casca (malha com elementos variando de $0,05 \times 0,05 \text{ m}^2$ até $0,40 \times 0,40 \text{ m}^2$) que representam o bloco através de um plano médio. O segundo é formado por elementos sólidos (malha com elementos em cubos de aresta igual a $0,40 \text{ m}$). Como a geometria do bloco para o modelo em elementos de casca é definida de forma aproximada, fazendo-se uma média das alturas, os resultados do peso próprio para as duas soluções apresentam pequenas perturbações. Sendo assim, para as análises desenvolvidas nesse trabalho não será levada a efeito a contribuição do peso próprio do bloco.

Apresentam-se a seguir os 2 (dois) modelos de cálculo com a discretização da malha para cada situação. As condições de contorno (estacas) foram representadas por molas elásticas lineares. Para o presente trabalho, adotou-se os coeficientes de mola iguais a $K_z = 90.000 \text{ kN/m}$ e $K_x = K_y = 18.000 \text{ kN/m}$.

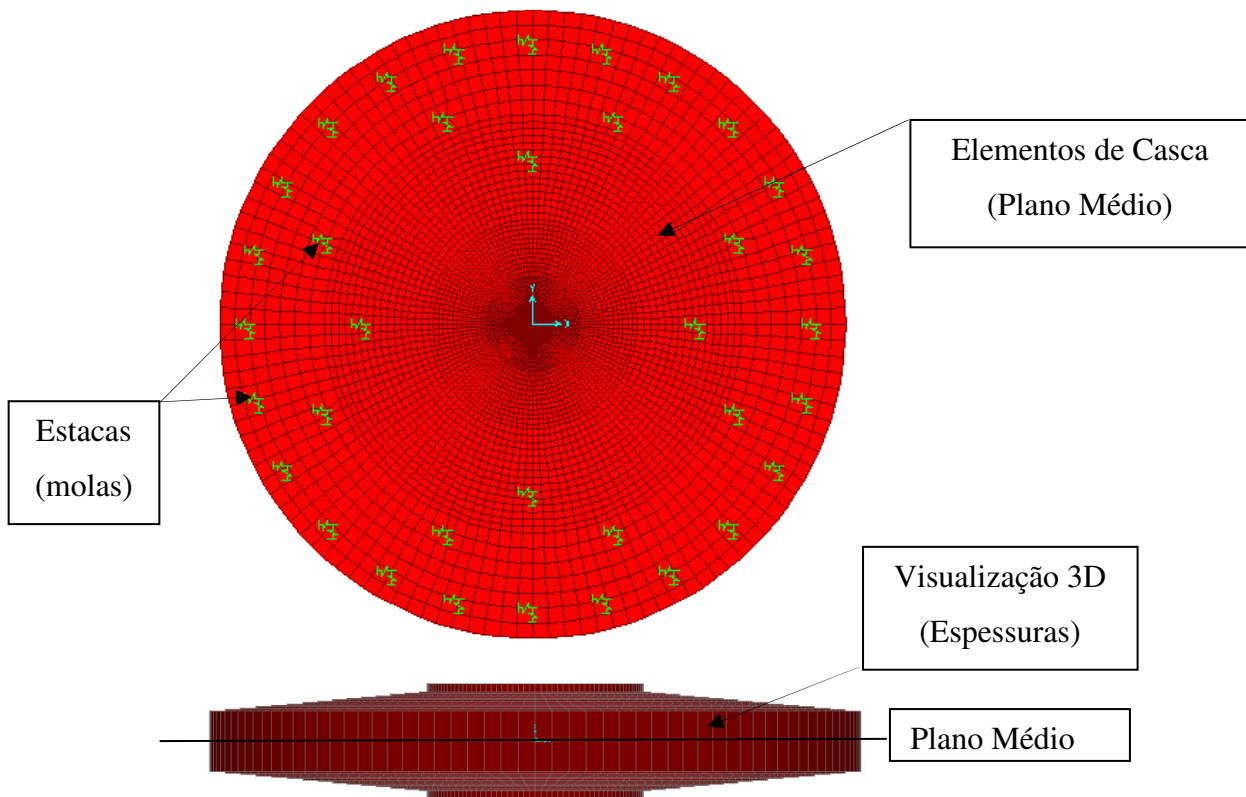


Figura 4.2 – Malha (Planta)/Espessuras (Seção) – Modelo em Elementos de Casca

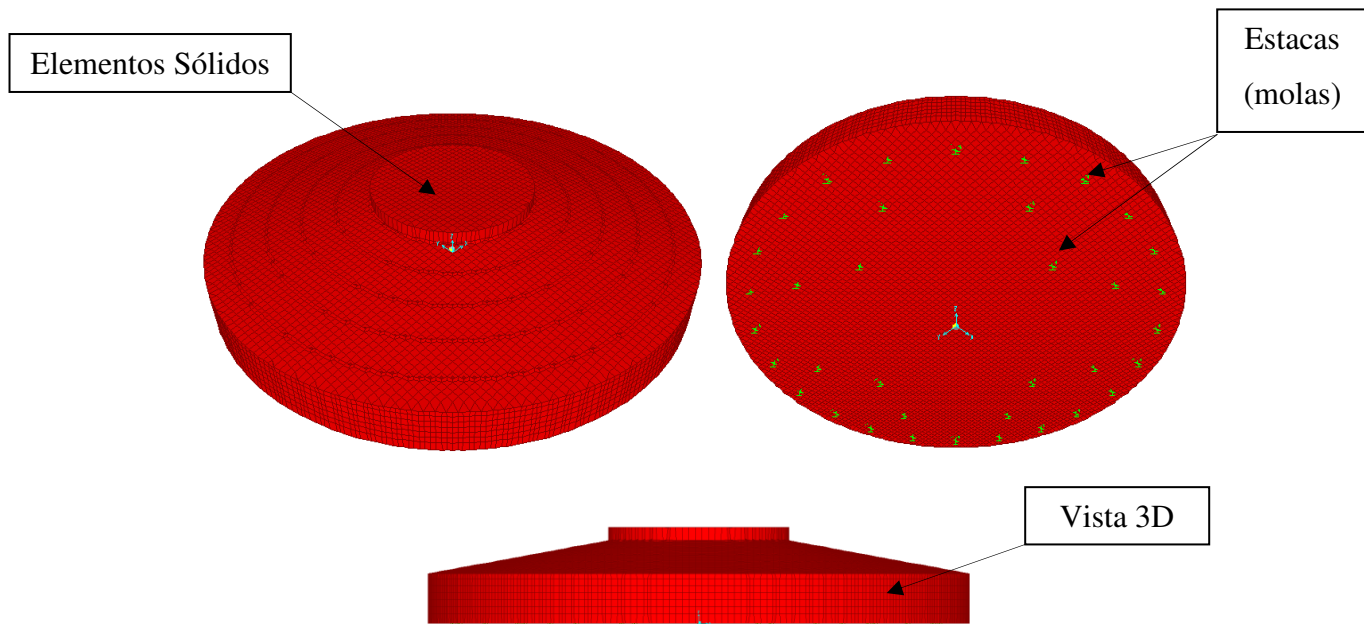


Figura 4.3 – Malha – Modelo em Elementos Sólidos

O carregamento principal, considerado no estudo, é correspondente às cargas do aerogerador. Esse carregamento é aplicado de forma representativa, distribuído em toda a área do pedestal do bloco e corresponde a pressão equivalente ao carregamento vertical devido ao peso próprio da torre $F_z = 2.939,0$ kN e momento $M_y = 66.549,0$ kN.m, aplicada no pedestal do bloco de fundação, conforme ilustrado a seguir:

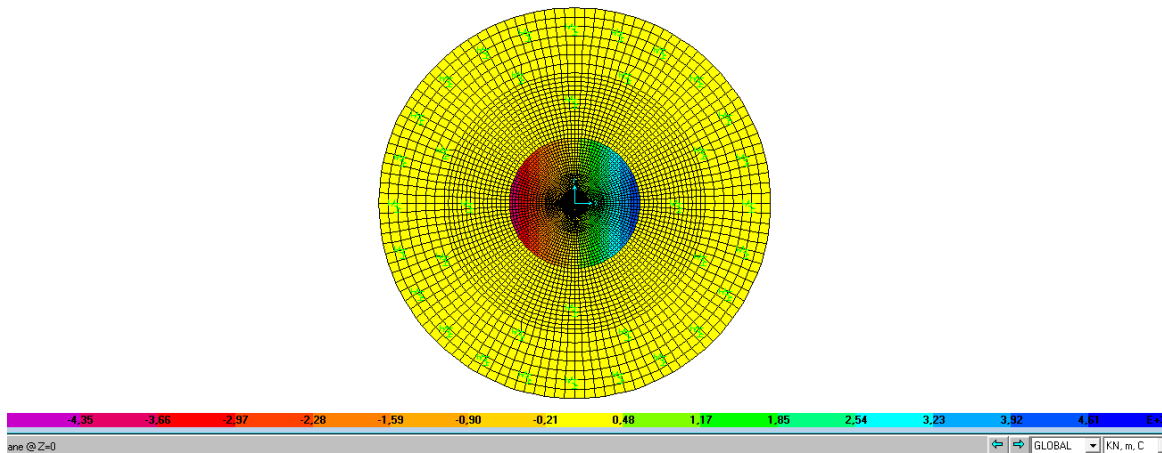


Figura 4.4 – Pressão Equivalente ao Carregamento Vertical e Momento, Aplicada no Pedestal do Bloco de Fundação – Modelo em Elementos de Casca

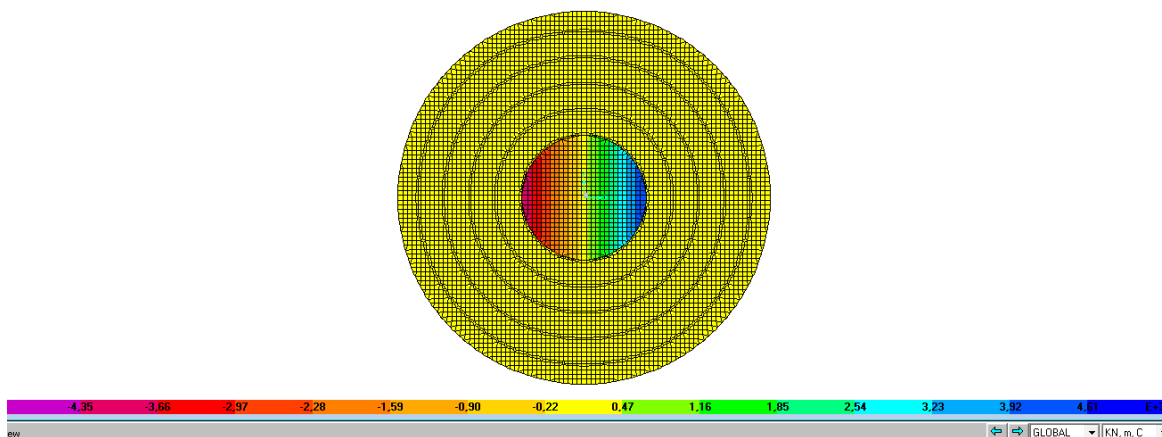


Figura 4.5 – Pressão Equivalente ao Carregamento Vertical e Momento, Aplicada no Pedestal do Bloco de Fundação – Modelo em Elementos Sólidos

Para os estudos, aqui apresentados, não serão considerados carregamentos horizontais. Desta forma, não aparecerá o efeito de membrana nos elementos do modelo de cálculo, implicando em resultados de esforços solicitantes no bloco apenas devidos à flexão da placa.

Outro carregamento considerado nos modelos de cálculo corresponde ao peso do reaterro sobre o bloco de fundação. Considerou-se como carregamento, o peso específico do solo, igual a 18 kN/m^3 , vezes a altura média do solo acima do bloco ($0,8 \text{ m}$), resultando em $14,4 \text{ kN/m}^2$, conforme apresentado a seguir:

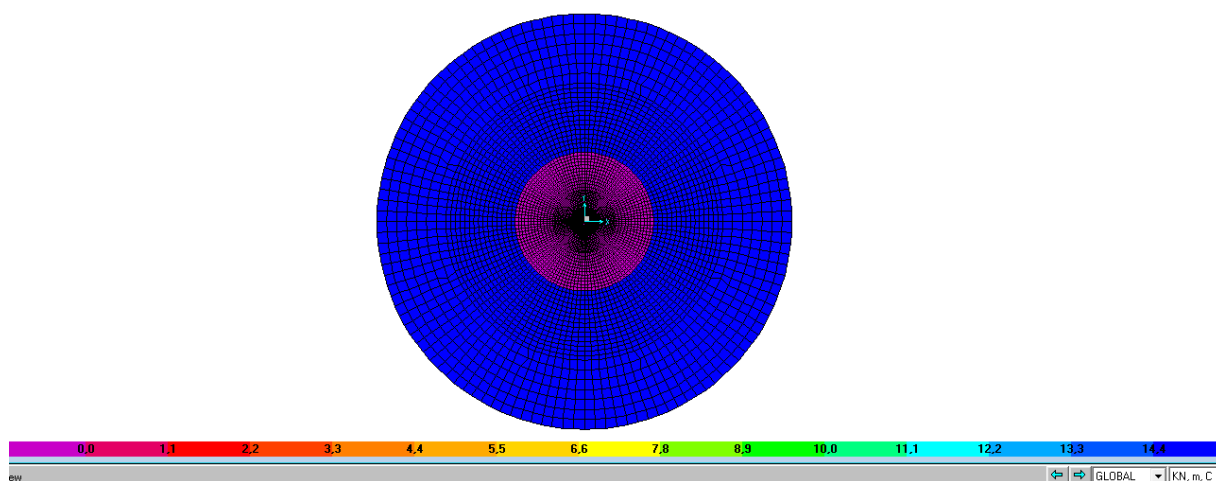


Figura 4.6 – Carregamento Correspondente ao Peso do Reaterro – Modelo em Elementos de Casca

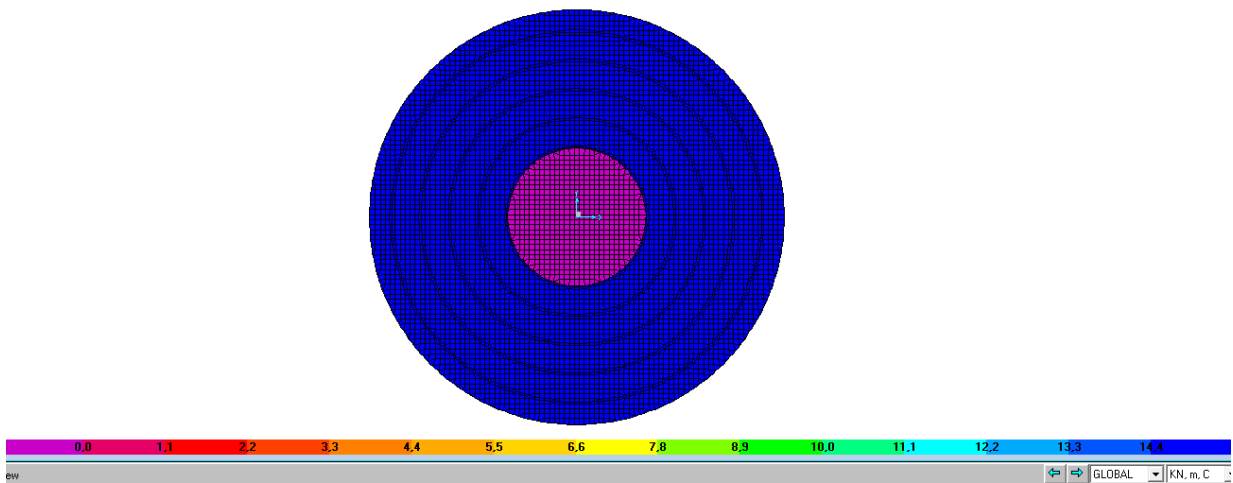


Figura 4.7 – Carregamento Correspondente ao Peso do Reaterro – Modelo em Elementos Sólidos

4.3 Resultados Obtidos

Inicialmente será apresentada uma avaliação comparativa das tensões normais (S11), em uma seção específica (Sec1) situada na linha central da base. Serão aferidas as tensões em uma linha de pontos distantes 3,46 m do centro da base. A altura da seção, nesse ponto, é igual a 2,37 m, tanto na definição do elemento finito do modelo de elementos de casca quanto na geometria definida para o modelo de elementos sólidos. Desta forma, fica justa a comparação dos resultados, já que as seções, no ponto da análise, são equivalentes nos dois modelos de cálculo.

As direções dos eixos locais dos elementos finitos, nos dois modelos de cálculo avaliados, seguem a mesma orientação do sistema de eixos global da estrutura, conforme pode ser visualizado a seguir:

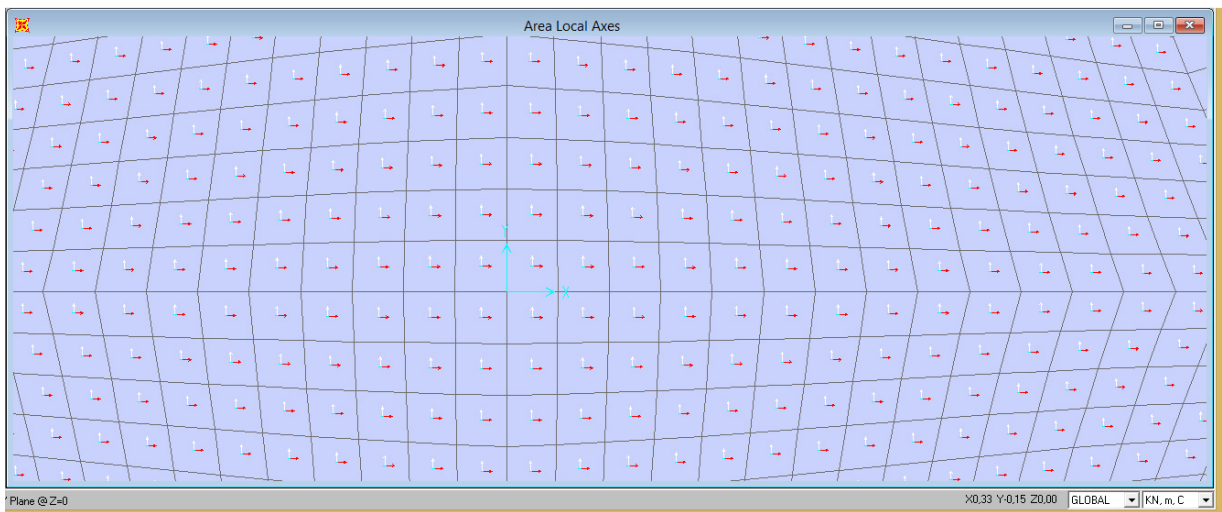


Figura 4.8 – Direção dos Eixos Locais – Modelo em Elementos de Casca

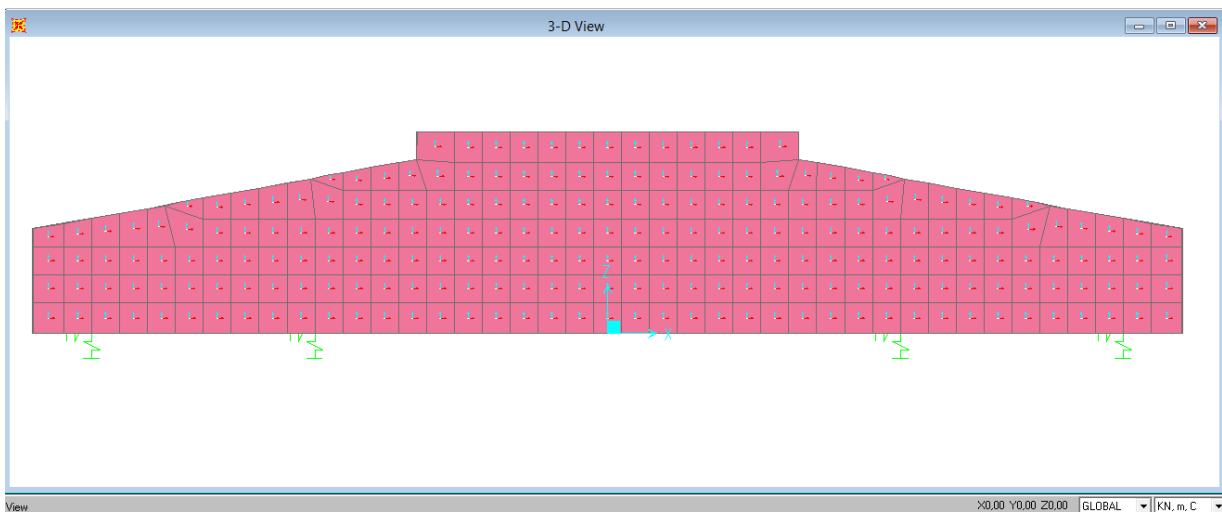


Figura 4.9 – Direção dos Eixos Locais – Modelo em Elementos Sólidos

Apresentam-se a seguir os diagramas das tensões normais (S11) para a seção avaliada em cada modelo de cálculo.

- Modelo em Elementos Finitos de Casca

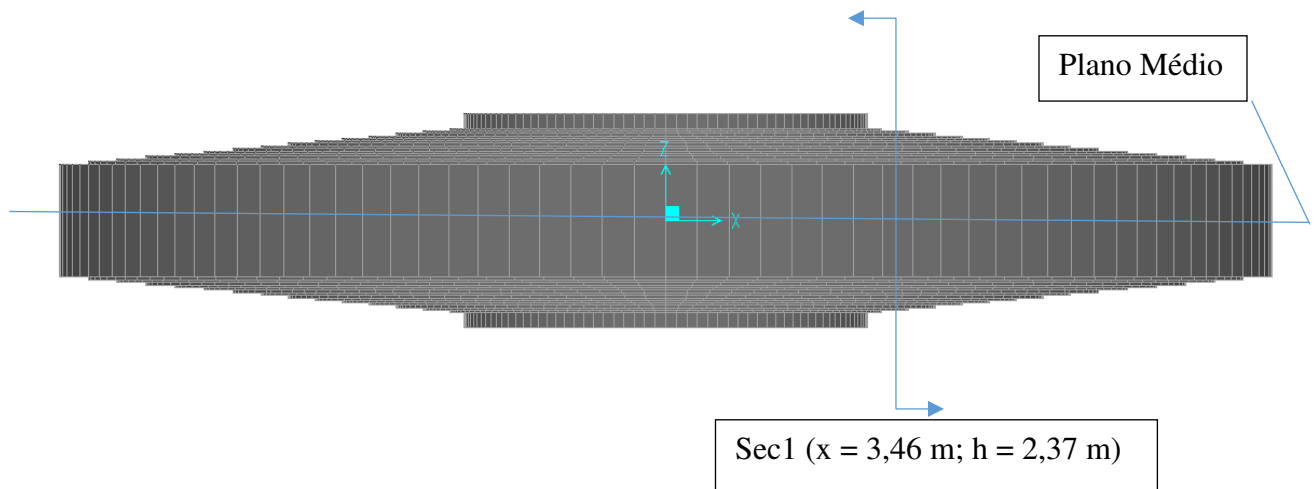


Figura 4.10 – Seção Avaliada - Modelo em Elementos de Casca (Visualização 3D - Espessuras)

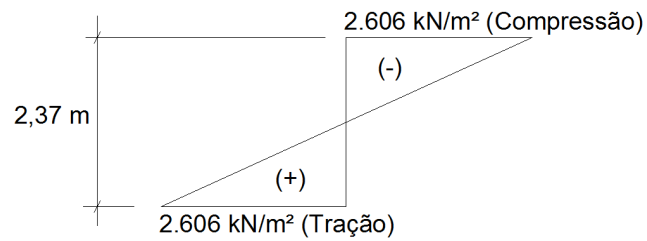


Figura 4.11 – Diagrama de Tensões (kN/m²) - Modelo em Elementos de Casca

De acordo com a teoria, o modelo em casca, representado pelo plano médio, apresenta diagrama de tensões linear segundo a direção perpendicular ao plano médio.

- Modelo em Elementos Sólidos

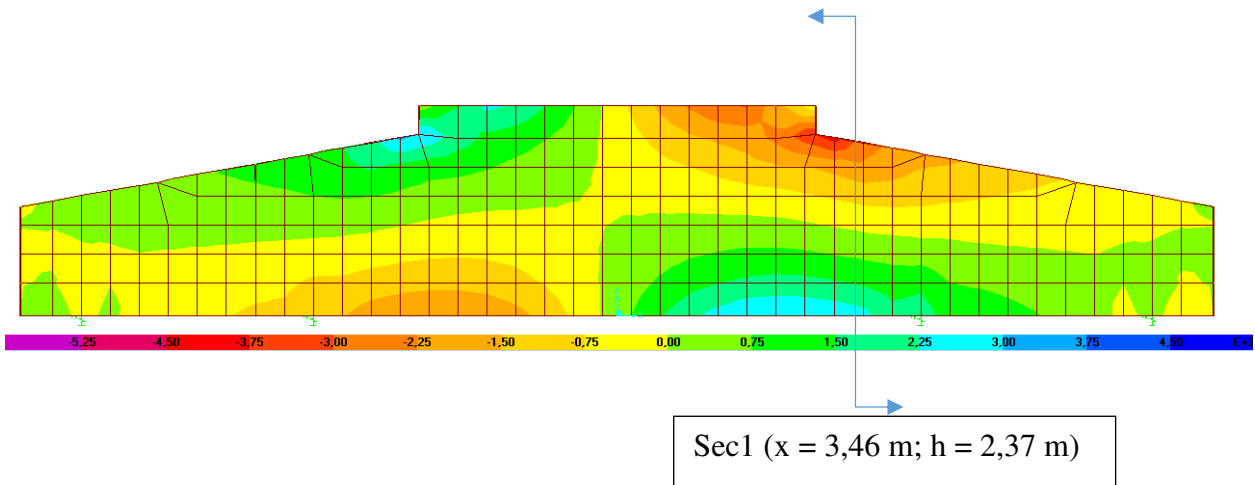


Figura 4.12 – Seção Avaliada - Modelo em Elementos Sólidos
(Visualização 3D – Tensões S11 – kN/m²)

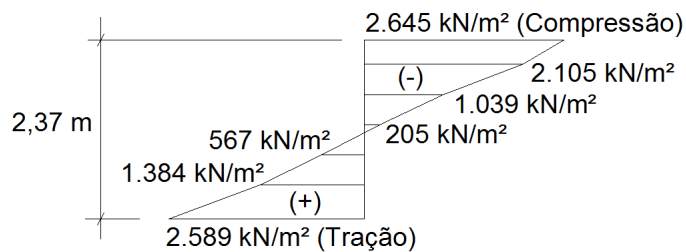


Figura 4.13 – Diagrama de Tensões (kN/m²) - Modelo em Elementos Sólidos

Conforme pode-se observar, o modelo em sólidos não apresenta diagrama de tensões completamente linear, indicando-se certo “empenamento” da seção.

Os resultados alcançados nos 2 (dois) modelos são muito próximos, considerando as peculiaridades de cada modelo. Desta forma, pode-se inferir que os 2 (dois) modelos são adequados para representar uma solução para a base de fundação do aerogerador.

A seguir, serão avaliados os deslocamentos nodais na mesma seção onde foram aferidas as tensões normais S11. Para o modelo em casca, o diagrama dos deslocamentos horizontais será inferido a partir da rotação do nó, representado no plano médio da estrutura. Para o modelo em

sólidos, o diagrama de deslocamentos horizontais será construído a partir da leitura direta dos deslocamentos nos nós da seção avaliada.

- Modelo em Elementos de Casca

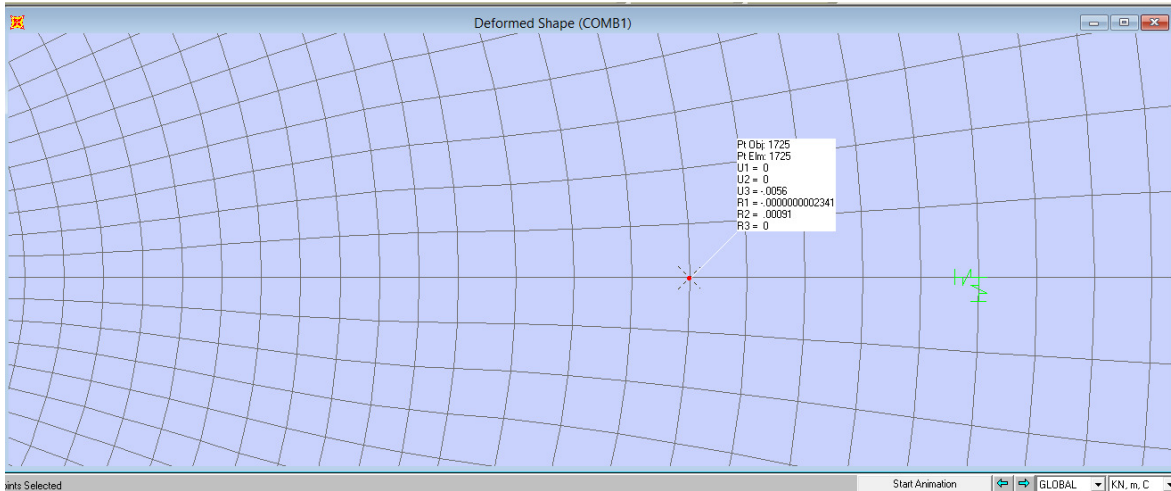


Figura 4.14 – Rotação Nodal R2 (rad) – Modelo em Elementos de Casca

A rotação obtida foi $R2 = 0,00091$ rad. Desta forma, o diagrama de deslocamentos horizontais pode ser apresentado a seguir:

$$\theta = \frac{0,00091 \times 180}{\pi} = 0,0522^\circ \Rightarrow \delta_{m\acute{a}x} = \text{tg}(0,0522) \times \frac{2,37}{2} = 0,0011 \text{ m}$$

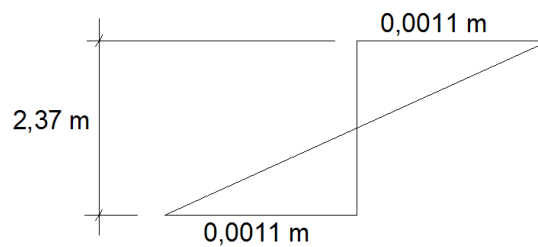


Figura 4.15 – Diagrama de Deslocamentos Horizontais – Modelo em Elementos de Casca

- Modelo em Elementos Sólidos

O diagrama de deslocamentos na seção transversal para o modelo em sólidos pode ser construído a partir da leitura direta dos deslocamentos nos nós da seção avaliada. O diagrama é apresentado a seguir:

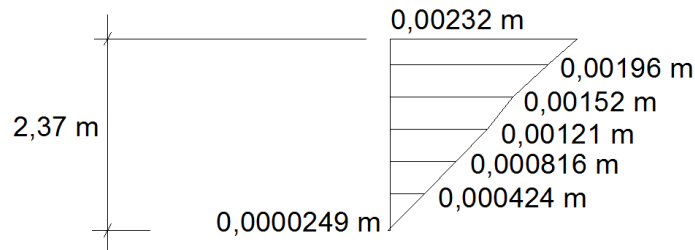


Figura 4.16 – Diagrama de Deslocamentos da Seção Transversal – Modelo em Elementos Sólidos

Conforme se pode observar o diagrama inferido para modelo em casca é diferente do diagrama construído por meio da leitura direta nos deslocamentos nodais da seção transversal do modelo sólido. De fato, isso se dá pela premissa adotada para o modelo de cascas onde se considera a seção plana após sua deformação. O deslocamento horizontal se apresenta nulo na linha central da seção. Entretanto, calculando, aproximadamente, o deslocamento diferencial da seção transversal para os dois modelos, encontram-se valores compatíveis, indicando proximidade nas rotações da seção transversal avaliada em cada modelo, conforme apresentado a seguir:

- Modelo em Elementos de Casca (Deslocamento Relativo)

$$\theta = \frac{1,1 + 1,1}{2,37} = 0,93 \text{ mm/m}$$

- Modelo em Elementos Sólidos (Deslocamento Relativo Extrapolado)

$$\theta = \frac{2,32 + 0,025}{2,37} = 0,99 \text{ mm/m}$$

Percebe-se que o modelo em elementos sólidos apresenta-se ligeiramente menos rígido do que o modelo em elementos de casca.

4.4 Estudo de Convergência

Para se ter uma sensibilidade na convergência dos resultados ao se adotar uma discretização mais refinada no modelo em elementos sólidos, processou-se o mesmo modelo anterior diminuindo consideravelmente a dimensão dos elementos finitos.

Alterou-se a dimensão do elemento finito, que possuía arestas iguais a 0,40 m, para elementos de arestas iguais a 0,20 m.

O resultado do diagrama de tensões normais S11 é apresentado a seguir:

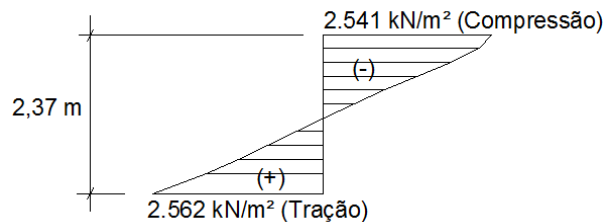


Figura 4.17 – Diagrama de Tensões (kN/m²) - Modelo em Elementos Sólidos

Pode-se observar que após o refinamento na malha, os resultados do diagrama de tensões na Seção avaliada convergiram melhor para o comportamento linear apresentado no diagrama da solução em elementos finitos de casca. Esse comportamento indica uma melhora nos resultados alcançados e, mesmo assim, o efeito de “empenamento” na seção transversal ainda pode ser observado. Com os resultados alcançados, pode-se inferir ainda que o modelo em elementos finitos de casca apresenta-se mais rígido que o modelo em elementos finitos

sólidos, justificado pela superioridade nos graus de liberdade, já que apresenta também graus de liberdade à rotação.

O resultado do diagrama de deslocamentos é apresentado a seguir:

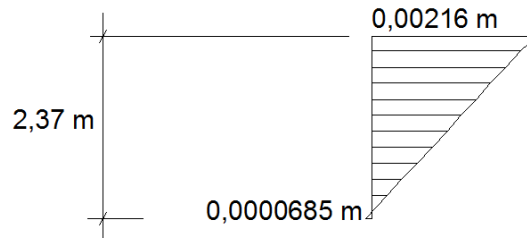


Figura 4.18 – Diagrama de Deslocamentos da Seção Transversal – Modelo em Elementos Sólidos

Calculando-se o deslocamento relativo extrapolado, encontra-se o seguinte valor:

$$\theta = \frac{2,16 + 0,0685}{2,37} = 0,94 \text{ mm/m}$$

Observando-se os resultados obtidos no diagrama de deslocamentos da seção transversal, pode-se concluir que o comportamento convergiu para comportamento linear apresentado no diagrama do modelo em elementos finitos de casca, resultado do refinamento processado na malha sólida.

4.5 Avaliação das Reações nas Estacas

Serão apresentados os resultados de reações nas estacas para os 2 (dois) modelos de Cálculo avaliados, comparados ao cálculo analítico aferido por meio do Método da Superposição, que considera o bloco rígido. Para a avaliação será levado a efeito apenas o carregamento oriundo do aerogerador, com $F_z = 2.939,0 \text{ kN}$ e $M_y = 66.549,0 \text{ kN.m}$.

O Método da Superposição dos esforços consiste em calcular a carga em cada estaca, somando-se separadamente os efeitos da carga vertical (N) e dos momentos aplicados no centróide do bloco (Mx e My).

Apresenta-se, a seguir, a expressão utilizada no cálculo das reações nas estacas (considerando-se que todas as estacas têm a mesma área).

$$P_i = \frac{N}{n} \pm \frac{M_y X_i}{\sum X^2} \pm \frac{M_x Y_i}{\sum Y^2}$$

Onde n corresponde ao número de estacas e Xi e Yi são as coordenadas do centro de gravidade das estacas.

Serão apresentadas as reações das três estacas mais comprimidas em uma extremidade do bloco e também a reação na estaca mais tracionada, localizada na extremidade oposta do bloco.

Esforços de compressão são positivos e esforços de tração são negativos.

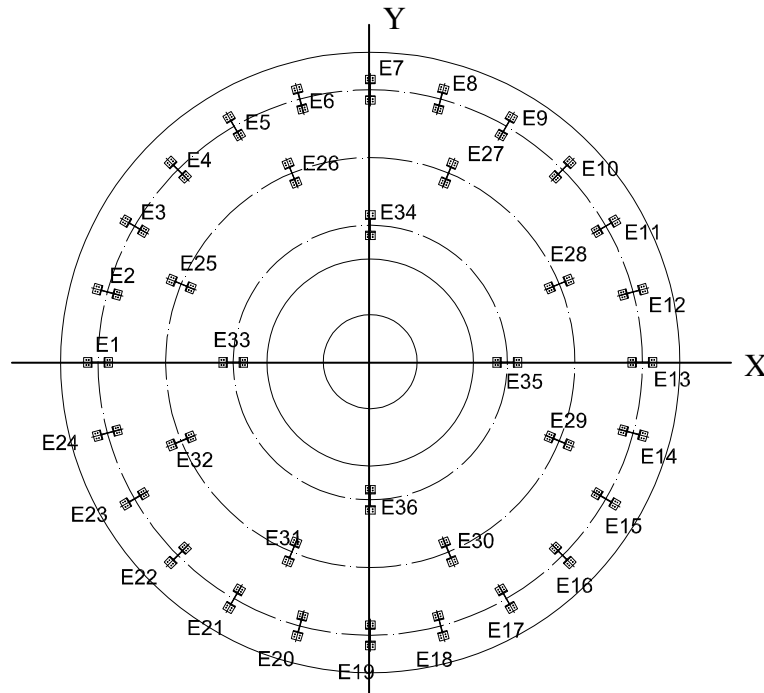


Figura 4.19 – Disposição das Estacas Metálicas

Estaca	Reações nas Estacas (tf)					
	coordenada		Método da Superposição	Modelo em Cascas	Modelo em Sólidos (a = 0,4 m)	Modelo em Sólidos (a = 0,2 m)
	x (m)	y (m)				
E 1	-7,46	0,00	-50,45	-51,88	-51,95	-51,82
E 12	7,22	1,95	64,89	66,01	65,54	65,83
E 13	7,46	0,00	66,77	68,00	67,49	67,50
E 14	7,22	-1,95	64,89	66,01	65,54	65,83

Figura 4.20 – Resultados de Reações nas Estacas (tf)

Conforme pode-se observar, os resultados de reações nas estacas, encontrados para os dois modelos de cálculo, são próximos entre si e se apresentaram coerentes aos valores calculados de forma analítica. Desta forma, pode-se inferir que os dois tipos de elementos finitos, avaliados no presente trabalho, são adequados para modelar uma estrutura de fundação para aerogeradores.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados encontrados, pode-se concluir que as expectativas levantadas na parte inicial do trabalho foram alcançadas. Pôde-se confirmar a proximidade dos esforços e deslocamentos encontrados na base de fundação tanto para um modelo menos sofisticado, representado por elementos do tipo “shell” quanto para um modelo mais sofisticado, representado por elementos do tipo “solid”.

Conforme já explanado, os diagramas de tensões normais (S11) e deslocamentos horizontais, em uma seção específica do bloco, se apresentaram muito próximos para os dois modelos estudados, ora com elementos de casca e ora com elementos sólidos. Observou-se que os diagramas do modelo em elementos sólidos, mesmo convergindo para um comportamento linear, similar ao modelo em elementos finitos de casca, apresentou certo “empenamento” da seção transversal. Esse efeito se dá devido aos esforços de cisalhamento que aparecem nas faces dos elementos sólidos. Entretanto, o “empenamento” apresentado foi brando, o que permite concluir que a teoria, para elementos de casca, em que a seção permanece plana após a

deformação se adequou bem ao modelo proposto para o bloco de fundação, apresentando resultados muito próximos para os 2 (dois) modelos.

Deve-se ressaltar que a ordem de grandeza dos resultados de pós processamento apresentados são muito particulares ao estudo desenvolvido nesse trabalho, pois foram feitas muitas considerações específicas em relação aos carregamentos considerados.

O estudo de convergência processado para o modelo em elementos sólidos, onde se refinou a discretização dos elementos finitos, apresentou resultados com comportamento convergente aos resultados alcançados no modelo em elementos de casca. Entretanto, pôde-se visualizar que os valores de tensões nos elementos sólidos foram inferiores aos visualizados nos elementos de casca. Esse comportamento permite inferir que o modelo em elementos finitos de casca se apresentou mais rígido que o modelo em elementos finitos sólidos.

Os resultados de reações nas estacas, para os dois modelos de cálculo avaliados, também se mostraram equivalentes e com valores adequadamente próximos aos calculados por meio de uma solução analítica.

Diante dos resultados alcançados, e embasado nas teorias para cada modelo de cálculo avaliado, pode-se concluir que a estrutura de uma base de fundação para aerogeradores, projetados em usinas eólicas, pode ser representado de forma satisfatória por um modelo em elementos finitos de casca, por apresentar resultados tão adequados quanto a um modelo mais sofisticado em elementos sólidos. Deve-se ressaltar ainda, que o tempo de resposta computacional para essa solução é muito mais eficaz e, até mesmo, o tempo de trabalho do projetista pode ser otimizado, por se tratar de um modelo mais simplificado mas com a mesma eficiência.

6 REFERÊNCIAS

ABE EÓLICA. <www.abeeolica.org.br> acessado em 29/05/2017.

ABNT NBR 6118:2014, Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento, *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, 2014.

ABNT NBR 6122:2010, Projeto e Execução de Fundações, *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, 2010.

ALONSO, U. R., Exercícios de Fundações, 2ª ed., São Paulo: Blucher, 2010.

AVELINO, A. F., Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE, 6ª ed., Saraiva, 2014.

OÑATE, E., Cálculo de Estructuras por el Método de Elementos Finitos, 2ª ed., *Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería*, 1995.